

木星の衛星イオに光合成硫黄細菌はいるだろうか

川上 紳一¹

地球では今から40億年以上も前に、原始海洋で化学進化が起こり生命が誕生した。地球以外の天体でも海があり、化学進化によって有機物の合成が可能であれば、生命が誕生したかもしれない。太陽系で生命が誕生した可能性のある天体として、火星、木星のガリレオ衛星の一つであるエウロパ、土星の衛星タイタンがある。ここでは、木星に最も近いガリレオ衛星イオに生命が誕生した可能性、その帰結、および探査へ向けた検討課題について考察する。

1. イオの世界

イオは太陽系の中で最も特異な天体である。イオの大きさは地球のまわりをまわる月よりわずかに大きいにもかかわらず、噴煙を上げている火山が多数発見されている。表面には衝突でできたクレーターはなく、表面地形は火山のカルデラ、溶岩流、溶岩平原からなる。これはイオの火山活動が活発で、新しい溶岩流が地表を覆ったり、火山噴出物が広範囲に降り積もっているためである。イオの火山活動を引き起こす熱源は潮汐加熱である。

イオの火山噴出物は硫黄や二酸化硫黄である。ホットスポットの中には温度が900Kに達するものもあり、シリケートメルトの火山活動の存在も示唆されている[4]。最近になって、イオの反射スペクトルの観測から水、二酸化炭素、硫化水素も存在する可能性が指摘されている[7], [11], [12]。

2. イオ環境下における生命の可能性

宇宙に生命が存在する条件には、液体状の水が存在することに加えて、生物を構成する物質として、炭素、窒素、リンなどが存在しなくてはならない。また、化学反応を進行させるエネルギー源も必要である。イオの表面には硫黄や二酸化硫黄が存在することが明らかにされているが、その他の化合物の存在する証拠やその存在度については観測データが乏しい。エネルギー源としては、太陽光のほかに活発な火山活動を維持している潮汐摩擦がある。また、木星のまわりの強力な電磁環境も重要な役割を果たしたかも知れない。

(a) ホットスポット

イオに生物が生息している可能性のある地域にホットスポットがある。ここでは太陽光のほかに火山活動によって供給される熱が生物活動に利用できる。現在のイオの表面には H_2O 、 CO_2 、 NH_3 などは乏しいとしても、シリケートメルトが流出しているホットスポット周辺では、局地的にはこれらが濃集している可能性はある。また、地球の中央海嶺のように、生物活動に必要な揮発性の分子や金属元素が熱水活動に伴って供給されている可能性もある。

(b) 原始海洋

イオの表面やそのまわりの宇宙空間にはナトリ

¹岐阜大学教育学部

ウムの雲が存在している。ナトリウムと二酸化硫黄が存在することから、イオの表面が蒸発岩であるという仮説が Fanale et al. [3] によって提案されている。この仮説によると、かつてイオには大量の水が存在していたことになり、それにとまって CO_2 , NH_3 , H_2S など大量に存在していたと考えられる。Kawakami and Mizutani [5] は、形成期のイオの表面に海洋が存在していたと仮定し、潮汐摩擦による発熱量を見積もっている。イオの初期が現在のエウロパのように、表面が氷の地殻で覆われていたとすれば、その深部には潮汐摩擦熱で海洋が存在していた可能性がある。現在のエウロパの氷地殻の下には厚い水の層があり、生物の生息可能な環境であるという指摘がある[10]。イオの原始海洋モデルに基づいて、生命の起源に必要な条件が整っているかを検討する必要がある。

(c) 硫黄細菌

イオの表面に大量にある硫黄の濃集機構として、光合成硫黄細菌が考えられないだろうか。地球の光合成硫黄細菌には、紅色硫黄細菌と緑色硫黄細菌がある。ともに絶対嫌気性で、光エネルギーを利用して硫化水素を酸化することにより有機物の合成を行っている。興味深いことに、硫黄細菌は周辺に硫化水素が欠乏しても生きながらえることができるように、細胞内に硫黄を蓄えるものもいる。イオの硫黄の前駆物質として硫化水素がマグマから供給されていたとすれば、このような細菌が生息していてもおかしくない。また、イオの表面近傍に大量に存在する固体硫黄を食べる無色硫黄細菌[14]が生息しているかも知れない。温泉水中に生息する無色硫黄細菌の群集は多量の硫黄を付着させており、硫黄でできた芝生のように見えることから硫黄芝と呼ばれている。

さらに FeS から直接硫黄をとりだして有機物を合成する「仮想的細菌」がいたかもしれない。た

例えば、Wächtershäuser [15] は、 FeS , H_2S から FeS_2 を合成することで炭素固定が可能であることを指摘し、この種の生物が地上で誕生した最初の生命であることを論じている。最近になって、細胞内にパイライトを生成している嫌気性硫黄細菌が発見され、生命の起源に対する鉄と硫黄の重要性が高まった[17]。このような化学反応を介してエネルギーを獲得することは効率が悪いので、地球上の光合成硫黄細菌と同様、その後光のエネルギーを利用するものが進化したと考えてもよいだろう。

ところで、古細菌のなかにハロバクテリア（好塩細菌）という、非常に塩分濃度の高い環境や岩塩中に生息している細菌がいる。同様に、イオのように硫黄が濃集した環境下では、細胞内に硫黄を取り込んだ生物がいた可能性はないだろうか。また、地球上で生まれた生物の光合成によって、地球表層環境は酸素汚染を被った。同様にイオでは硫黄細菌の放出する硫黄や二酸化硫黄が表層に濃集した可能性はないだろうか。これらの検討を早急に行う必要がある。

3. 硫黄の起源

現在の知識ではイオに硫黄細菌が生息するという積極的データは存在しない。そこで、イオの表面の硫黄の起源が生物の活動した傍証になるかを考えてみよう。表面の硫黄が無機的に濃集できるか。できるとすれば、その条件を検討してみよう。

(a) イオの集積過程

木星のガリレオ衛星、イオ、エウロパ、ガニメデ、カリストは、木星から離れるに従って平均密度が減少している。イオを除くこれらの衛星は、シリケート核をとりまいて厚い氷マントルが存在している。このように木星からの距離によって平均組成が系統的に変化することから、ガリレオ衛星

は太陽系のミニチュアであると考えられている。

Pollack et al. [8]やPrinn and Fegley[9]は、原始木星の熱的進化モデルを計算し、現在のガリレオ衛星の軌道における原始木星星雲の冷却史を見積もって、揮発性物質 H_2O 、 NH_4SH 、 NH_3 、 CH_4 の凝縮温度と比較している。当然のことながら、木星に近い星雲ほど冷却はゆっくりしており、ガリレオ衛星の組成は、衛星の集積の時間スケールと原始木星星雲の冷却の時間スケールのかねあいで決まる。もし、イオの集積が H_2O の凝縮以前に起こったならば、イオには H_2O や NH_4SH などの揮発性成分がほとんど集積しなかったことになる。この場合、イオの表面の硫黄は FeS として集積したことになるだろう。しかし、イオの表面や軌道上にトラス状に分布するナトリウムの雲が存在しているので、初期のイオに全く H_2O が集積しなかったわけではなく、エウロパのように厚さ数kmから数10kmの H_2O の層が存在したと思われる。また、 H_2O は、含水珪酸塩として集積したり、イオの形成後に彗星の衝突によって有機物質とともに供給された可能性もある。一方、ガリレオ衛星の集積が、原始木星星雲における揮発性成分の凝縮後に起こったとすれば、イオにも多量の H_2O 、 NH_4SH などが集積したことになる。この場合、イオのその後の進化によって大量の H_2O が散逸しなければならぬ。

以上の議論は、イオの揮発性物質の存在度とその進化を明らかにするには、イオの初期状態を定量的に評価する必要があることを示唆している。そのためには、原始木星の形成過程とその熱的進化、原始木星星雲における衛星の形成過程、ガリレオ衛星の軌道進化、潮汐摩擦や火山活動の時間変動など、再検討すべき課題は多い。

(b) 原始海洋の散逸過程

イオ表面に大量にある硫黄の起源を考えるには、

形成期に硫黄が FeS として集積したのか、 NH_4SH として集積したのかが大きな問題である。ここでは NH_4SH として集積したと考え、イオの揮発性成分の進化を考察する。

Kawakami and Mizutani [5]は、潮汐加熱によってイオの表面に海洋が存在していたと仮定し、ジーンズ散逸過程によるイオからの H_2O の散逸率を見積もり、イオが初期にガニメデのようであった場合、現在のようなイオに進化する可能性が低いことを論じている。

火山の噴煙として放出された揮発性物質が宇宙空間へ散逸する可能性はどうだろうか。現在の噴煙活動では二酸化硫黄の流出速度は $500\text{m/s} \sim 1\text{km/s}$ であり、イオの脱出速度より小さいので、現在のイオ環境ではその効果は低い。かつては火山ガスとして水も存在していたとすれば、大規模な水蒸気爆発が起こったかもしれない。水蒸気爆発を伴う火山の噴煙活動によって揮発性成分が散逸したかもしれない。

イオには噴煙活動によって維持された希薄な大気がある。この大気の上層部では、木星の磁場によって加速された荷電粒子が衝突しており、大気分子がイオン化されて散逸している。現在のイオでは、トラスへのナトリウムの供給率は 1000kg/s と推定されており[2]、46億年かけてもイオの質量の0.1%程度である。

イオにおける小天体衝突による大気の散逸の見積もりも行う必要があるだろう。衝突による大気の散逸は、火星では必要な役割を果たしたと考えられている。

現段階では不確定な要素が多いが、イオの生命起源を考えるにあたり、かつてイオには現在のエウロパ程度の H_2O が存在していたことは十分考慮してよいだろう。

(c) シリケートマグマの分化で硫黄の海は作れる

か

「イオの硫黄はbiogenicである」という命題の真偽を検討する材料はないので、ここではnon-biogenicに硫黄を濃集できるかを検討してみよう。

惑星材料物質として引き合いに出されるものに隕石がある。隕石には還元的なエンスタタイトコンドライトから酸化的な炭素質コンドライトまである。エンスタタイトコンドライトでは、硫黄は主にFeSとして存在しているが、炭素質コンドライトは酸化的で揮発性成分に富むようになり、硫黄はFeSO₄、MgSO₄としても存在している。それではイオの材料物質として、どのような隕石を想定するのが妥当であろうか。

硫黄は比較的酸化的環境化でのみ安定である。惑星材料物質(Fe-S-O系)から遊離した硫黄を生成する条件は限られている。Lewis(1982)の熱力学計算によれば、FeS₂-CaSO₄系が温度1200Kにおかれると遊離した硫黄と二酸化硫黄が生じる。このような組成をもつ隕石として、金属鉄の乏しいC3V、C2M隕石が考えられる。Consolmagno[1]やLewis[6]は、FeとH₂Oが反応してFeOとH₂が生成され、イオの内部が徐々に酸化されたというシナリオを提案しているが、このモデルではイオの材料物質の集積温度は非常に狭い範囲(400-500K)でなければならない。また、FeとH₂Oの反応で生成したH₂を効率的に脱ガスする必要がある。イオがコンドライト組成であるとする、表面の硫黄は10%未満であり、残りの硫黄はFeSとしてイオ内部に存在するか、46億年の間に宇宙空間へ散逸したと考えなければならない。

一方、Takahashi[13]はFeO-FeS-FeバッファードL3コンドライトの融解実験を行って、シリケートメルト中に硫黄が0.2wt%含まれることを示している。コンドライト中には硫黄は2-5%含まれているので、シリケートメルト中に溶け込んだ硫黄がすべて火山ガスとして地表に運ばれたと考えて

も、表面の硫黄量として十分である。シリケートメルト中の硫黄の溶解度はFeOの存在度や圧力にも依存する[16]ので、高温高压実験を行って議論に必要なデータを得る必要がある。

以上の議論では、イオが比較的酸化的材料物質から生成されたことを要請している。火星もそういった意味では表面は比較的酸化的であり、中心核には大量のFeSが存在すると考えられている。イオの表面になぜ硫黄が濃集したかという問題を考えるにあたって、火星の表面になぜ硫黄が濃集しなかったのかを考えることも重要であろう。

要約すると、イオの表面に硫黄が存在することは、必ずしも「惑星進化の必然的帰結」ではないといってよさそうだ。

4. イオの生命探査へ向けて

イオに生命が存在したとする仮説を検証するには、直接探査を行えばよいだろう。どのような観測装置でどのような証拠を得れば、イオに生物がいる、あるいはいたという傍証が得られるだろうか。以下では将来イオの生命探査を念頭においた、以下の研究課題を提案する。

(1) イオの初期海洋すなわち、硫黄に富んだ海水を想定して、ユーリー・ミラー型の実験を行う。硫黄を含んだアミノ酸(システイン)、チオール、スルフィド、チオシアン、スルホン酸などが合成されるか、あるいは合成される条件を実験的に明らかにする。生成される有機化合物の中で、システイン、チオキナーゼ、チオグルコシアーゼ、鉄硫黄タンパク質(フェレドキシン)など、地球生物に認められる硫黄有機物が生成されればおもしろい。

(2) これらの物質の赤外線スペクトルを測定する。実際に、CH₂-S結合、CH₃-S結合には、1000~3000 cm⁻¹の領域に吸収帯をもっている。しかし、これらの物質は存在度が低い、あるいは局所的に

濃集している可能性があるので、高分解能赤外線スペクトロメーターの開発など、検出のための技術的な課題も解決しなくてはならないだろう。

(3) 地球上での硫黄生成細菌, FeS利用細菌の探査. イオの表面に生息している,あるいはかつて生息した可能性のある微生物の生化学, 生物物理学的性質を明らかにするには, 地上で硫黄濃度の高い環境で生育している細菌研究の発展に依存している。

5. まとめ

イオに光合成硫黄細菌がいる可能性について, 検討課題の概要を述べてきた. 全くの妄想と言われてしまえばそれまでであるが, イオの生命起源を検討するには, 木星やガリレオ衛星の起源, 進化をきちんと定量化することが必要であり, 「イオに生物はいるか」という問いは, まじめに考える価値があると思われる。

謝辞. イオに光合成硫黄細菌がいるかというアイデアは, 「全地球史解説—生命と地球の共進化」シンポジウムで, 初期地球で生息した生物がどのようなものかを, 古生物学, 生化学, 生物物理学, 微生物学などの研究者との議論から生まれたものである. 愛媛大学理学部井上徹氏, 岡山大学理学部浦川啓氏には, 硫黄の地球化学について有益なコメントを頂いた. 名古屋大学の熊沢峰夫教授, 藤井直之教授には, イオに生物が生息する可能性について議論して頂いた. 本研究には, 文部省科学研究費総合研究(A)デジタル画像情報を用いた比較惑星地質学の総合的研究(代表者佐々木晶東京大学助教授, 課題番号05302026)の研究費の一部を使用した. ここに記して感謝いたします。

参考文献

- [1] Consolmagno, G.J., 1981: Io: thermal model and chemical evolution, *Icarus*, **47**, 36-45.
- [2] Dessler, A.J., 1980: Mass-injection rate from Io into the Io plasma torus, *Icarus*, **44**, 291-295.
- [3] Fanale, F.P., Johnson, T.V., and Matson, D.L., 1977: Io's surface and the histories of the Galilean satellites. In *Planetary Satellites*, edited by J. A. Burns, pp.379-405, Univ. Arizona Press.
- [4] Johnson, T.V., Veeder, G.J., Matson, D.L., Brown, R.H., and Nelson, R.M., 1988: Io: evidence for silicate volcanism in 1986, *Science*, **242**, 1280-1283.
- [5] Kawakami, S. and Mizutani, H., 1980: Escape of H₂O from Jovian satellite Io, *Proc. 13th Lunar Planet. Symp.*, 346-356.
- [6] Lewis, J.S., 1982: Io: geochemistry of sulfur, *Icarus*, **50**, 103-114.
- [7] Nash, D.B. and Howell, R.R., 1989: Hydrogen sulfide on Io: evidence from telescopic and laboratory infrared spectra, *Science*, **244**, 454-457.
- [8] Pollack, J.B., Grossman, A.S., Moore, R., and Graboske, H.C.Jr, 1976: The formation of Saturn's satellites and rings, as influenced by Saturn's contraction history, *Icarus*, **29**, 35-48.
- [9] Prinn, R.N. and Fegley, B., 1981: Kinetic inhibition of CO and N₂ reduction in circumplanetary nebulae: implications for satellite composition, *Astrophys. J.*, **249**, 308-317.
- [10] Reynolds, R.T., Squyres, S.W., Colburn, D.S., and McKay, C.P., 1983: On the habitability of Europa, *Icarus*, **56**, 246-254.

- [11] Salama, F., Allamandola, L., Witteborn, F., Cruikshank, D., and Sandford, S., 1990: The 2.5-5.0- μ m spectra of Io: evidence for H₂S, H₂O frozen in SO₂, *Icarus*, **83**, 66-82.
- [12] Sanford, S.A., Salama, F., Allamandola, L.J., Trafton, L.M., Lester, D.F., and Ramseyer, T.F., 1991: Laboratory studies of the newly discovered infrared band at 4705.2cm⁻¹ (2.125 micrometers) in the spectrum of Io: the tentative identification of CO₂, *Icarus*, **91**, 125-144.
- [13] Takahashi, E., 1984: Melting of a Yamato L3 chondrite (Y-74191) up to 30 kbar, *Mem. Nat. Inst. Polar Res. Spec. Issue No.30*, 168-180.
- [14] 高桑進, 1980: 固体イオウを食べるバクテリア, *化学と生物*, 18, No.8, 748-756.
- [15] Wächtershäuser G., 1988: Pyrite formation, the first energy source for life: a hypothesis, *Sys. Appl. Microbiol.*, **10**, 207-210.
- [16] Wendlandt, R.F., 1982: Sulfide saturation of basalt and andesite melts at high pressure and temperature, *Am. Mineral.*, **67**, 877-885.
- [17] Williams, R.J.P., 1990: Iron and the origin of life, *Nature*, **343**, 213-214.